

(25) トンネル切羽の力学的挙動

飛島建設 福島啓一

Mechanical behaviour of the tunnel face

Tobishima Co., Keiichi Fukushima

Abstract

The most remarkable difference of the tunnel's mechanical behaviour from other ordinary structure like bridge, building, etc. is that, there is a load before construction work's beginning, so in the front of the tunnel, the construction work is done simultaneously to transfer the force from the ground to be going to excavate to the support members or to the surrounding ground.

So, the behaviour of the ground in the front depends on the time, construction methods, tunnel size, etc. whose mechanical properties were not yet revealed.

The author tries to find out the factors of them including difference between surface and inside of materials, difference between upper yield point and lower one, transfer of potential energy and their time lag, stability of the front, loosening of the ground and their effects etc..

1. はじめに

トンネル構造物が一般の構造物と最も違う所は荷重が先にあって、切羽ではこの荷重を次々と移し替えながら施工が行われるので、その時点での安全を確保しなければならないことはもちろんであるが、その影響が完成後も残るので、さらに慎重に対処する必要があることである。しかも土被りや地質によっては破壊のぎりぎりの状態に近くなることがあるので、弾性体や弾性-完全塑性体の仮定では判明しない現象も多い。切羽の大きさ、掘削から支保までの時間、地質、支保工法などの数多くの要因が関係するが、これらの要因と現場で起こる事象、計測結果とを結付ける力学について考察を試みる。

2. 切羽の特色

上記のトンネルそのものの特色に加えて切羽には次のような特異な問題点がある。

立体的である。時間が短い。時間の経過で形、構造が変わる。一時的に地山の表面がむきだしであり、一般には後で支保される（むきだしの地山は支保や覆工コンクリートに比べ材質のバラツキが多い）。多くの作業員が働いている。落石、切羽の崩壊や緩みなどを多くの人が観察しており、必要に応じて対策を取っている（強度ギリギリの状態になることも多い）。切羽の高さ、一回発破の長さなどは切羽の自立の具合をみて変化させている。発破による振動をうける。湧水が切羽についてまわることがある。切羽の奥の地山の状態は分らない。一寸先は闇であるが、切羽の奥の軟弱地山や高圧帯水層などの影響がある。実験も測定も難しい。計算は当然難しい。完成構造物でなく、一種の仮設であるから、発注者や学者の検討の対象になる事も少なく、坑夫の経験とカンにまかされていることが多い。その他、従来の構造力学の応用だけでは解明出

来ない問題点がある。

3. 実際の挙動を考えにいたしたトンネル力学の試み

3-1) 物の表面はエネルギーを持っているので、内部とは違う性質を持っている。中西ら(*1)は軟鋼の引張り試験で図1のような応力-ひずみ曲線を得ているが、途中での段差は強度の弱い表面がここで降伏するためである、表面に近い結晶は内部にある結晶に比べ半分しか拘束されていないため強度が小さいせいであるとしている。

切羽に薄いコンクリート吹付けをすると安定性が著しく増すのはこの表面の弱い層を補強するためと考えられる。切羽に限らず吹付けコンクリートの効果にはこの表面強化の要素が大きい、実験なども難しく殆ど説明されていない。

3-2) 上降伏点と下降伏点との差 図2に軟鋼の応力-ひずみ曲線を示す。この様に一旦はかなり高い強度を示すがこれは長続きせずこれより多少低い強度で安定するのが材料強度の一般的性質である。これは液体や気体の過冷却、動摩擦と静摩擦の差、結晶が出来る条件になっているが、種がないと結晶の成長がなかなか始まらないなどの現象と同じと考えられる。そして一旦どこかでせん断が始まるとその面だけで動くことが多い。これを例えば梁の曲げで考えると(図3)、曲げモーメントが一定の区間でも降伏した部分とまだ弾性状態の部分とが生じるが、どちらも同じ大きさの曲げモーメントを負担している筈であるから、弾性強度 σ_e は降伏後の強度 σ_y の1.5倍以上なければならぬことになる。これは材料はいわゆる強度(破壊強度または降伏強度)に達しても直ちに破壊や降伏をするわけではなく、一種の過冷却状態とおなじの過応力状態になっており、なんらかの刺激(振動など)があつて初めて破壊や降伏をすると考えられている(*1,*2)。ところで、“過冷却は液体がきれいなほど起こりやすい”。また“大抵の結晶をつくる物質は、ごく微量であるときを除き2,3度しか液体状態で過冷却することはできない。しかし液体がごく小さい滴にわかれていると、数百度も過冷却出来ることが知られている。液体を小さく分けるとあるものには不純物が含まれなくなって均一な核の形成が起きるまで過冷却されえるのである”(*3)、という。つまり寸法効果である(*4)。過応力状態の強度(上降伏点)も一般の強度以上に強い寸法効果をもっている。寸法効果については別に述べたので(*5)詳しいことは省略するが、寸法効果の程度は岩質により変わるが、強度の変動が大きいほど寸法効果が大きい。変動係数がゼロの時が従来の構造力学で取扱われていた範囲であり、寸法効果は無い。いま岩についてのデータが無いが、例えば軟鋼でも上降伏点の変動係数は20%, 引張り強度の変動係数は5.1%程度であることから、岩石の場合も上降伏点の強度の方が変動が大きいし、殆どそれに頼る切羽ではトンネル一般部以上に強い寸法効果を受けることが分る。

3-3) エネルギーの伝達

トンネル周辺の地山を破壊するエネルギーは地山内に蓄えられている弾性ひずみエネルギーの一部が応力

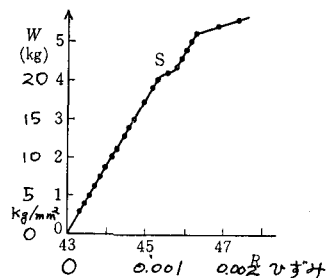


図1 $\phi 0.5\text{mm}$ 焼きなまし線の応力-ひずみ図

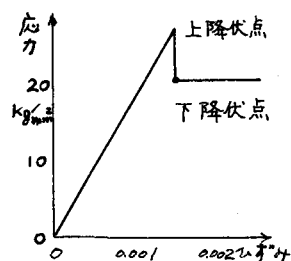


図2 軟鋼の応力ひずみ図

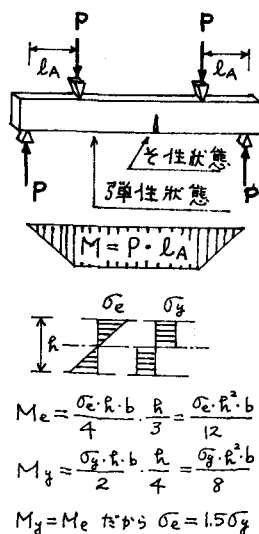


図3 梁の応力状態

解放にともない放出されてきたものである。弾性エネルギーはもちろん弾性波速度で伝わる訳であるが、塑性状態になると弾性率Eが見掛け上ほぼゼロになるので（ひずみ軟化ではマイナスになる？）、エネルギーの伝達速度＝ $\sqrt{\text{弾性係数} \div \text{密度}}$ も非常に小さくなってしまふ。つまり地山の強度が短時間は高いのに加えて破壊や降伏のもとになるエネルギーの供給に時間が掛かるのでレオロジー論などを用いて普通に計算するととうに崩壊してしまいそうな地山でもかなりの時間は自立していることになるようである。

この問題について従来議論されたことはないようであるが、被りの深い、変形量も大きいいわゆる膨脹性地山と呼ばれている所のトンネルではこの点を考えないと理解困難な現象が起きる。

3-4) 切羽の安定

従来切羽の安定の計算式としてはLauffer の図、Terzaghi-村山の理論、Broms-Bennermark の理論などが知られている。村山は緩み高さ（切羽の大きさに関係）と切羽地山のせん断抵抗の比で安定を判断している。Broms ら(*6)の理論によると切羽の高さは安定に関係なく、地山強度と土被り深さの比が問題である。Myer ら(*7)はこの二つの要因だけでは不足で、1.トンネルの掘進速度、2.地山の初期応力条件 3.トンネルの寸法、4.地山の強度や変形特性、5.掘削工法(TBMか、削孔爆破か)、6.支保工や覆工の方法、7.一時的に無支保工の区間の長さ、8.地下水条件、9.トンネルの形 について検討する必要があるが特に初めの1～4項が重要としている。またこれらを明らかにするための実験もしている。掘削速度と土圧の例ではTBMで急速掘削することにより、種々の対策工法を採用しても時間がかかり、難行したところを容易に掘れた例もあることを報告している。

施工法と切羽の安定の関係では、切羽の分割（横に分割するのはあまり意味が無い。切羽の安定にはトンネルの高さが関係する）。切羽面の補強（さね残し工法——アーチ支保工の設置のため足元を掘るとき、崩壊しやすい。アーチ支保工に頼るのを止めれば、多段ベンチでよい。切羽を斜めにする工法。ミニベンチ工法——全断面掘削したところにあるジャンボやずりだし機械で施工できるので、能率が良い。切羽の安定が悪いときは、上半の高さを減らす、または2段ベンチにするとよい）。天端の補強（一間を短くする、斜めボルト、ミニパイプアーチ）などを考える必要がある。

3-5) 切羽でのゆるみ ベンチ工法で掘削しているときどうにもならなかったトンネルが多段導坑では難無く掘れたという例は多い(Eisenhower T (*7)等)。切羽を小さくすることで掘削時間が短くなり、一方寸法が小さい分自立時間は長くなるので切羽の安定が良くなり、地山のゆるみも減るためであるが、この緩みは単に施工しにくいだけでなく、完成したトンネルへの荷重を増やすと言う作用があるので、将来のトンネルの健全度にも大いに関係する。しかもこれは単にTerzaghiの言うようなゆるみ荷重が増える程度でなく、アーチの上と側壁部との沈下量の差により大きな荷重が作用する可能性がある(*5)。（埋設管に働く荷重を計算するのに使われるMarstonの式で計算できる）。一旦ゆるんだ地山がどのくらい圧密されるかはたとえばロックフィルダムがその上に盛り立てられた石塊の重みで1～5%くらい沈下するのが参考になる。弾性変形(0.1%位)やクリープ(弾性変形の2～4倍位)ではこんな大きなひずみは生じないし、塑性変形では体積変化は膨脹かまたは殆ど生じないので性質が違う。

3-6) インバート掘削の一回の長さ、閉合までの時間など

吹付けコンクリートが閉合していない状態は支保工の変形がかなり出来る状態であり、一面では不安定の要素もあるが（この不安定はロックボルトで補強出来る）、地山への荷重の盛り替えもできる大事な時期であり、この時間をいたずらに短くしすぎても悪い。ロックボルトで十分補強してあるトンネルでは前兆があるので、前兆がなければ変形速度がある程度小さくなるまでは閉合しないほうが良い。この意味で仮インバートも一般には荷重の地山への盛り替えを阻害する害の方が大きい。但し土かぶり小さく許容変形量、許容地表面沈下量に制限があるときは別に考える。

3-7) 断面内の支保工と地山内の支保工

NATMの特色の一つは原則として断面内には支保工を設けず、地山内に支保工を作ることである。これは施工途中の応力状態から完成時の応力状態へ上手に転換させるのに大事なことである。断面内に支保工を設置する場合もそこで分担している応力を何時、どのように地山に移し換えるかが大切であり、これが上手に出来ないと害になることさえある。断面内に支保工が無いと大形の施工機械が使えて能率が良くなるのは勿論である。

3-8) 立体的な考慮

トンネルは普通は平面ひずみ状態の二次元構造と考えてよいが切羽では三次元で考える必要がある。例として、側壁導坑方式の時、図4aのような断面分割をやる人が多い。断面図の上で考えると施工途中の安全のためにこれだけの分割や支保が必要と思うが、いざ実際にやってみると、施工しづらいし、側壁導坑の撤去時には前後のアーチや、側壁の吹付けコンクリートが連続しているの

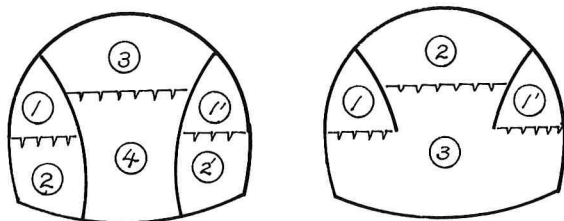
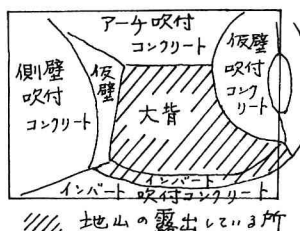


図4 (a) (b)

で（写真）これは全く安全すぎる位な設計であることが分る。図4bのよ



うな断面分割で十分同じ安全性を確保できると考えられる。

3-9) いなし工法の得失

切羽では、掘削した瞬間は支保工は無いので、一般の場合は何の抵抗

もない空間に向かって地山が膨脹して行き、そこには抵抗がないので地山は何の仕事もせず、今まで持っていた弾性ひずみエネルギーは地山内にひび割れをつくる事に使われ、その表面エネルギーに変換される。

いなし工法の場合（図5）導坑の周辺の地山の強度でその奥にある地山は強い拘束圧力を受けたまま変形させられるので、外部（後で掘ってしまうその内

側の地山）に対し仕事をする。したがって地山の強度低下を招くようなひび割れやゆるみの発生は地山の奥の方ではまず無い。トンネル周辺のごく近くの緩んだ所は次の切り広げのとき掘ってしまうので将来のトンネル地圧に及ぼす問題もない。導坑の断面は小さく、切り広げの時の切羽面も小さいので、ゆるみの絶対量も小さい。切り広げのとき、導坑の支保工が切羽ボルトの役をするので、ゆるみはさらに小さくなる。膨脹性地山で支保工が大きく変形させられてし

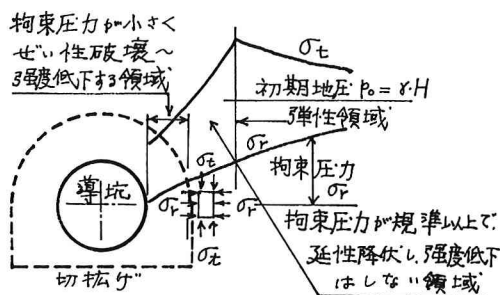
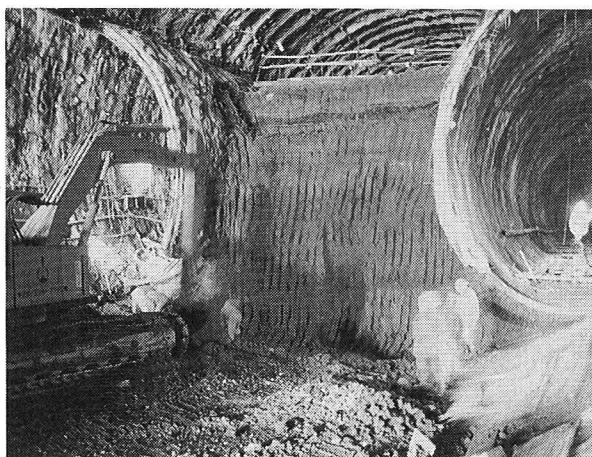


図5 いなし工法の応力状態

まい縫い返しをするとき、地山は意外と安定していることは多くの人が報告していることであるが、その力学的な意味はこのようなものであり、その応用がこのいなし工法であろう。

3-10) 観察・計測の重要性

過応力の時は強度のばらつきが大きい。破壊時間も非常にばらつく。したがって、計算や調査だけでは破壊時間を予知することは難しく、現場での観察、計測が大切である。ただし何を観察し、計測するかは問題であり、現在やられている項目が十分、完全とは言えない。

4. まとめ

水とトンネル切羽の挙動、切羽に働く動水圧、切羽の中間の高さに地下水位がある場合、不透水層の向うに帯水層（特に被圧帯水層）がある場合、非定常の透水量の計算式など残された問題が多いが別の機会に譲りたい。

トンネル力学は先ずは弾性力学や弾塑性力学の応用として発達してきたが、今後更に発展させるためには現実のトンネルで何が起きているかをよく見て、取入れていく必要がある。その一助になればとおもい普通無視されているような現象を列挙してみた。

参考文献

- 1) 中西不二夫、佐藤和郎；材料力学、岩波全書、1970
- 2) 佐藤和郎；材料の強度と塑性（新しい機械工学 4） 森北出版 1980
- 3) M. J. Sinnott; 技術者のための固体力学、丸善 1962
- 4) W. Weibull; A statistical theory of the strength of materials, Proc. Roy. Swed. Ins. for Engrs. Reseach, No. 151, 1939
- 5) 福島啓一；山岳トンネルの新技术（32～33）トンネルと地下 1989, 11～12, 土木工学社
- 6) B. Broms, H. Bennermark; Stability of clay at vertical openings, proc. ASCE SM&F div. Jan. 1967
- 7) L. R. Myer, T. L. Brekke, C. T. Dare, R. B. Dill, & G. E. Korbin; An investigation of stand-up time of tunnels in squeezing ground, 1981 RETC Proc. Ch. 86